

Versuch M01

Messung der Schallgeschwindigkeit in Gasen mit dem Quincke'schen Interferenzrohr

12. März 2020

I Lernziele

- Schallwellen in Gasen und Schallgeschwindigkeit
- Quincke'sches Interferenzrohr
- Adiabatenexponent

II Physikalische Grundlagen

II.1 Schall in Gasen

Der **Schall** breitet sich in Gasen als **mechanische elastische Longitudinalwelle** aus.

Das ist eine **Druckwelle** - von der Quelle breiten sich die Fronten aus mit dem höherem und tieferem Druck [1,2], die auf den Abb.1 und Abb.2 zu sehen sind.

Wir können den Schall hören, wenn die Druckwelle das Tommelfell unserer Ohren erreicht und vibrieren lässt. Dann sind wir auch die Empfänger.

In einem Metallrohr, wie das auch unserem Experiment in diesem Versuch der Fall ist, sind das deutliche flache Fronten (Abb.1).

In offenem Raum von einer Punktquelle (wenn z.B. jemand im Zimmer spricht) breiten sich sphärische Fronten aus (Abb.2).

Für die Schallausbreitungsgeschwindigkeit c in Gasen hat ISAAC NEWTON uns 1710 die Formel gegeben [3]:

$$c = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \quad (\text{NEWTON'sche Formel}) \quad (1)$$

wobei p den Druck und ρ (Rho) die Dichte bedeuten.

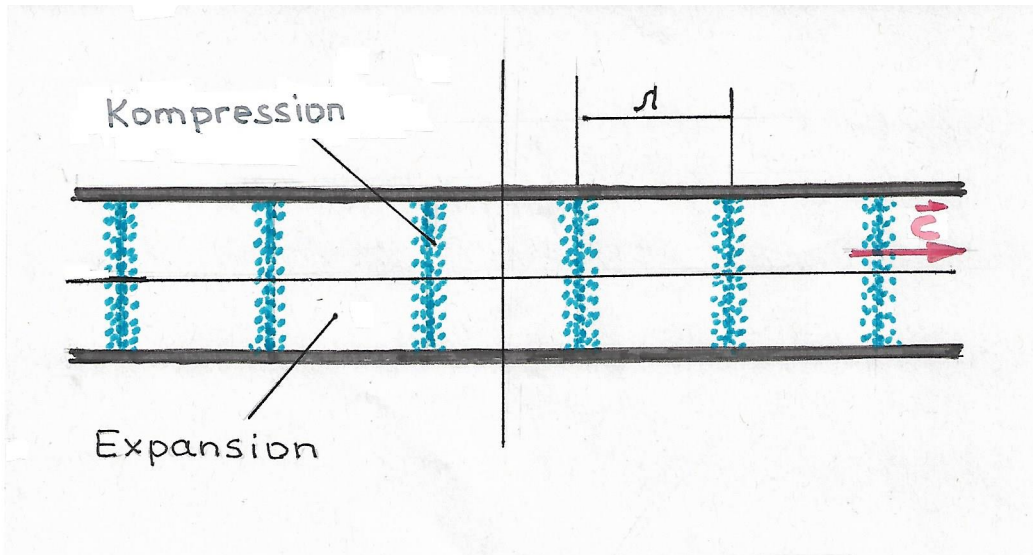


Abbildung 1: Die Ausbreitung einer Schallwelle in der Luft in einem Metallrohr.

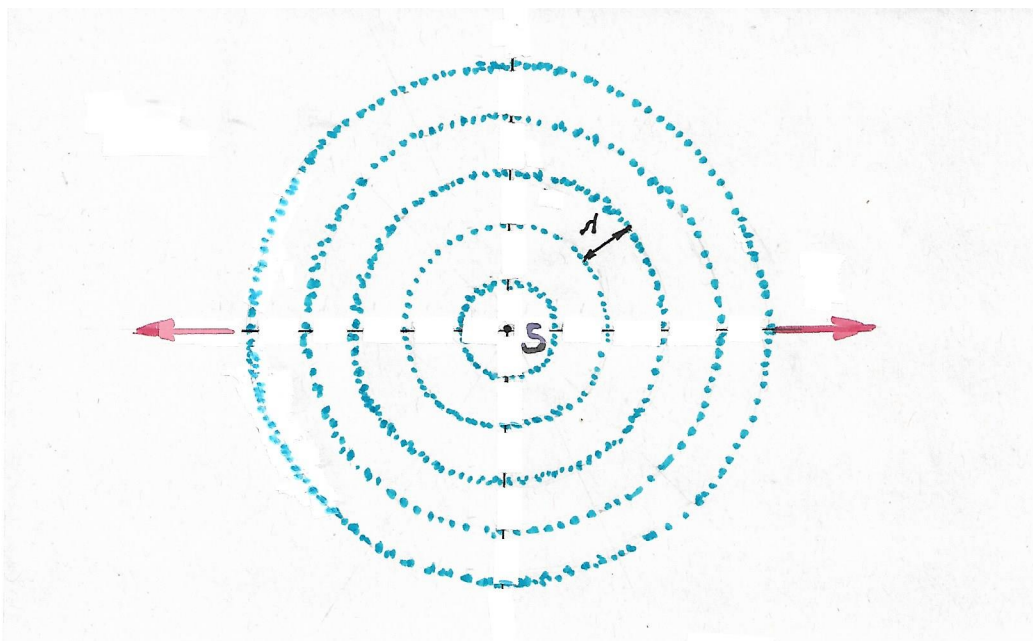


Abbildung 2: Die Ausbreitung einer Schallwelle in der Luft von der Punktquelle im offenen Raum.

NEWTON war von **isothermen** Vorgängen in der Schallwelle ausgegangen. Die durch Kompression entstehende **Temperaturerhöhung** wurde in diesem Fall vernachlässigt.

Mit der Zeit sammelten sich aber erhebliche Diskrepanzen zwischen zahlreichen experimentellen Ergebnissen und den nach der NEWTON'schen Formel berechneten Werten.

1816 hat PIERRE-SIMON DE LAPLACE in dieser Formel den **Adiabatene exponent** κ (Kappa) eingeführt:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} \quad (\text{LAPLACE'sche Formel}) \quad (2)$$

Der Adiabatene exponent berechnet sich aus den **spezifischen Wärmekapazitäten** bei konstantem Druck c_p und bei konstantem Volumen c_v gemäß:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

LAPLACE ging dabei von der damals neuartigen Vorstellung aus (und hatte auch viel bessere Laborbedingungen 105 Jahre später als NEWTON), dass die schnell aufeinander folgenden Kompressionen und Expansionen in den elastischen Schallwellen **adiabatisch** erfolgen, also dass das gesamte System die Wärme nach außen dabei nicht abgibt.

Grund für die beiden Annahmen war, dass die **Zeit** bei hohen Frequenzen dafür kaum ausreichen würde:

$$t = \frac{1}{f}$$

wobei t die Zeit und f die Frequenz bedeuten.

Die **adiabatische** Annahme gab eine viel bessere Näherung zu experimentellen Daten. Damit war die Ursache für die Diskrepanzen gefunden.

II.2 Quincke'sches Interferenzrohr

GEORG QUINCKE hat im Jahre 1866 zur Untersuchung akustischer Interferenzen das Interferenzrohr entworfen, das auch seinen Namen trägt.

Das Besondere daran ist, dass das QUINCKE'sche Interferenzrohr aus zwei Rohrbögen besteht, von denen der eine **posaunenartig** ausgezogen werden

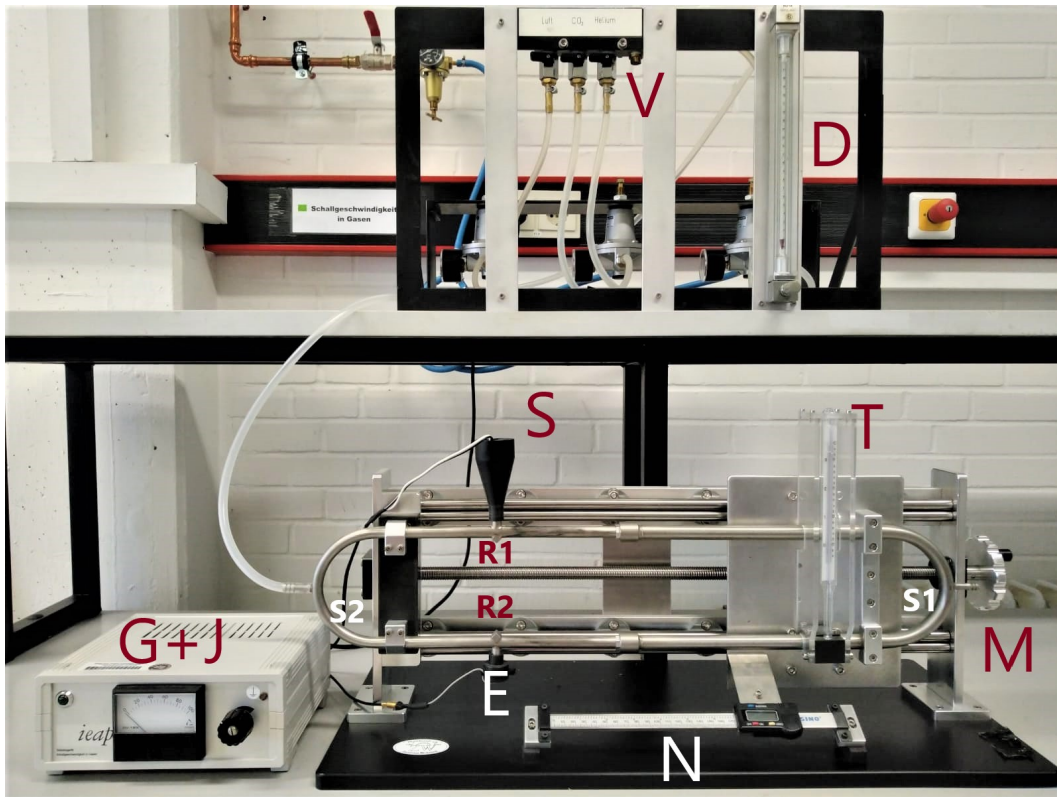


Abbildung 3: QUINCKE'sches Interferenzrohr im unseren Labor.
G - Generator, **S** - Schallsender, **R1** und **R2** - Reflektoren, **E** - Schallempfänger, **S1** und **S2** - Rohrbögen, **N** - Skala, **J** - Ablesegerät (Instrument), **M** - Ausziehmechanismus, **T** - Thermometer, **V** - Gasventile für 3 Gase, **D** - Druckmessrohre

kann.

Das QUINCKE'sche Interferenzrohr ist auch das Kernstück der Apparatur, mit der wir in diesem Versuch die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen messen werden.

Die Abb.3 zeigt und erklärt den Versuchsaufbau mit dem QUINCKE'schen Interferenzrohr in unserem Labor.

Der **Generator G** erzeugt eine sinusförmige Wechselspannung der Frequenz f und betreibt den elektroakustischen Wandler **S** als **Schallsender**.

Die ELEKTROMAGNETISCHE Welle wird in eine MECHANISCHE Schallwelle

umgewandelt. Diese Druckwelle spaltet sich am **Reflektor R_1** in zwei Teilwellen auf.

Sie durchlaufen die beiden verschiedenen Wege **S_1** und **S_2** (von **R_1** bis **R_2** im linken und rechten Rohrbogen), treffen sich und überlagern sich nach der Spiegelung an **R_2** vor dem **Schallempfänger E** .

Der rechte **Rohrbogen S_2** (Abb.3) kann mit dem **Mechanismus M** ausgezogen werden.

Der Schallempfänger wandelt die Summe der beiden Teildruckwellen wieder in eine ELEKTROMAGNETISCHE Welle (in eine proportionale Spannung) um, die durch den Verstärker geht und schließlich am **Instrument J** abgelesen wird.

Der Gangunterschied der am Empfänger interferierenden Teilwellen kann durch Verändern von S_2 variiert werden und an der **Skala N** wird diese Veränderung gemessen.

Anfangs- und Endtemperatur messen wir mit dem **Thermometer T** .

Besonders gut lassen sich die **Interferenzminima** auswerten.

Aus der Messung ihrer Abstände gemäß:

$$s_2 - s_1 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ mit } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

kann zuerst die **Schallwellenlänge λ** (Lambda) und dann nach:

$$c = \lambda \cdot f \quad (4)$$

die **Schallgeschwindigkeit c** berechnet werden.

II.3 Freiheitsgrade

Die **Freiheitsgrade** beschreiben die voneinander unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten der Moleküle. Deshalb hat die Zahl der Freiheitsgrade großen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit in Gasen.

Wir arbeiten in diesem Versuch mit **Hellium**, **CO_2** und der **Luft** als Gasmischung. Bei der **Luft** gehen wir von einer Volumenzusammensetzung von 79% **N_2** und 21% **O_2** aus.

Im allgemeinen ist die Zahl der Freiheitsgrade eines Moleküls:

$$F = 3 \cdot n \quad (5)$$

wo n die Anzahl der Atome bedeutet.

Wir berücksichtigen hier die Freiheitsgrade, die die Schallgeschwindigkeit beeinflussen werden.

1-atomiger **Helium** hat die **3 Freiheitsgrade** der TRANSLATION.

Bei 2-atomigen **Sauerstoff** und **Stickstoff** kommen noch 2 zusätzliche Freiheitsgrade der ROTATION und auch ein SCHWINGUNGSFREIHEITSGRAD dazu (SCHWINGUNGSFREIHEITSGRADE werden normalerweise bei der Berechnung der inneren Energie doppelt gezählt, bei diesen Molekülen aber bei niedrigen Temperaturen sind sie ausgefroren).

Deshalb berücksichtigen wir bei ihnen **5 Freiheitsgrade**.

Das gilt auch für die **Luft**, die wir hier als Mischung der beiden Gase betrachten.

Das gewinkelte, aber trotzdem gestreckte **CO₂**- Molekül bekommt noch den dritten ROTATIONSFREIHEITSGRAD und auch die zwei SCHWINGUNGSFREIHEITSGRADE sind hier aktiv.

Wir berücksichtigen hier **7 Freiheitsgrade**:

3 Freiheitsgraden der TRANSLATION,

2 Freiheitsgraden der ROTATION,

2 SCHWINGUNGSFREIHEITSGRADE.

III Aufgaben

III.1 Schallgeschwindigkeitsbestimmungen

Die Frequenz des Schallsenders ist für alle Messungen konstant und beträgt

$$f = (8000,0 \pm 0,8) \text{ Hz}$$

III.1.1 Hinweise zur Versuchsdurchführung

- Zur genauen und schnellen **Wellenlängenbestimmung** ist es am günstigsten, die genauen Lagen der beiden Schallintensitätsminima nahe bei

maximal und **minimal möglichem Posaunenauszug** mit höchstmöglicher Präzision einzustellen und auf der Skala abzulesen, und dabei auch sämtliche auf dieser Strecke liegenden Minima zu zählen. Der Abstand dieser beiden Extremlagen ist die **Verschiebung** δ (Delta).

Die Anzahl **sämtlicher Minima** auf dieser Verschiebung ist m . Dann ist $\delta = (m - 1)\frac{\lambda}{2}$ und somit die gesuchte Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{2\delta}{m - 1} \text{ mit } m = 2, 3, 4 \dots \quad (6)$$

- Fangen Sie zuerst mit der reichlich vorhandenen **Pressluft** an, um sich mit den praktischen Details des Experiments vertraut zu machen und um sich zu trainieren, höchste Präzision zu erreichen.
- Zum **Gas einschalten** rufen Sie bitte den Betreuer oder den Hilfwissenschaftler.
- Nach den Messungen mit der **Luft** machen Sie die Messungen mit **CO₂** und schließlich mit **He**.
- Beim **Gaswechsel** achten Sie auf sorgfältigen Austausch der Füllgase, so dass stabile Messungen der Minima möglich sind.
- Für jedes Gas führen Sie zügig hintereinander 3 hochpräzise Verschiebungsmessungen aus, ermitteln Sie die je drei oben erklärten Endlagenwerte und bestimmen Sie daraus die **Wellenlänge**.
- Da in aller Regel die **Raumtemperatur** leicht ansteigt, messen Sie unmittelbar vor Beginn und nach Beendigung der Verschiebungsmessreihe möglichst genau die Anfangs- und Endtemperatur.
- Mit dem Mittelwert dieser Temperaturen berechnen Sie die **Schallgeschwindigkeit** c und **Schallgeschwindigkeit** c_0 bei Normalbedingungen.

Vorsicht!

Um bei der Verschiebungsmessung immer eine **vollständige Füllung** des Interferenzrohres mit dem gewählten reinen Gas sicherzustellen, soll stets eine leichte, die Schallgeschwindigkeit nicht störende **Gasströmung** bestehen.

Der Messzylinder in der **Druckmessrohre D** (Abb.3) muss sich in der Mitte der Skala befinden bei ca.12 Einheiten.

Bei den Verschiebungsmessungen achten Sie darauf, das Vergrößern des Posaunenauszugs so **langsam** vorzunehmen, dass unter keinen Umständen Luft durch die kleinen Gasaustrittsöffnungen des Interferenzrohres angesaugt wird!

Die jeweiligen **Gasventile V** (Abb.3) sehr vorsichtig öffnen und nach dem Versuch sorgfältig wieder verschließen!

III.1.2 Experiment

1. Bestimmen Sie die **Schallgeschwindigkeit** c mit bei jeweils bestehenden Raumtemperaturen T (in Grad Celsius) mit Hilfe (3) und (4), wobei man den **maximal möglichen Hub** des posaunenartigen Auszugs ausnutzt.
2. Ermitteln Sie die Schallgeschwindigkeiten c_0 **unter Normalbedingungen** (0°Celsius, Atmosphärendruck) für die ein-, zwei- und dreiatomigen Gase Helium, Luft, Kohlendioxid.
Zu den Werten für Normalbedingungen gelangt man über die Beziehung:

$$c_0 = \frac{c}{\sqrt{1 + \alpha T}} \quad , \quad \alpha = \frac{1}{273,15^\circ\text{C}}$$

3. Erstellen Sie eine Tabelle (**Tab.1**) mit: Anzahl der Minima, Abstand (in mm), T (in Grad Celsius), Wellenlänge λ (in mm), c und c_0 (in m/s) für alle drei Gase.

III.2 Ermittlung den Adiabatenexponenten

1. Berechnen Sie den **Adiabatenexponenten** κ mit den eben ermittelten Schallgeschwindigkeiten aus der (2) für die drei Gase. Dazu lässt sich (2) mit Hilfe der Zustandsgleichung für ideale Gase zu:

$$\kappa = c^2 \frac{M}{RT}$$

umformen, mit

M molare Masse

R universelle Gaskonstante

T absolute Temperatur in Kelvin

Zur Berechnung des **Molekulargewichts der Luft** berücksichtigen Sie eine Volumenzusammensetzung von 79% N₂ und 21% O₂.

Für die Differenz der molaren spezifischen Wärmekapazitäten bei konstantem Druck und konstantem Volumen gilt: $c_p - c_V = R$

Pro Freiheitsgrad gibt es einen Beitrag von $1/2 R$ zur molaren spezifischen Wärme c_V .

2. Erstellen Sie eine Tabelle (**Tab.2**) mit Ihren Ergebnissen für c_0 und κ für die drei Gase.
3. Fügen Sie zum Vergleichen die nach der gaskinetischen Theorie unter Berücksichtigung des **Gleichverteilungsgesetzes** zu erwartenden Werte (Literaturwerte) für c_0 und κ in Tab.2 hinzu. Diese Werte können Sie selbständig im Internet finden.
4. Diskutieren Sie die Methode mit dem QUINCKE'schen Interferenzrohr. Finden Sie sie präziser für die Bestimmungen von Schallgeschwindigkeiten und Adiabatenexponenten? Schreiben Sie Ihre kurze **Zusammenfassung** des Versuches und erklären Sie Ihre Ergebnisse am Ende des Protokolls.

IV Fragen und Diskussionspunkte

- Wie breitet sich eine Schallwelle in Gasen aus? Wie können wir den Schall hören?
- Newton'sche und Laplace'sche Formeln. Warum ist die adiabatische Annahme möglich?
- Wie ist Adiabatenexponent definiert? Wie wird er im Versuch berechnet?
- Quincke'sches Interferenzrohr und Versuchsaufbau erklären.

- Wieviel Freiheitsgrade haben die in diesem Versuch verwendete Gase? Welche Auswirkung hat das auf die Schallgeschwindigkeit? Warum?

Literatur

- [1] D. Halliday, R. Resnik, J. Walker: *Halliday Physik*. Wiley-VCH 2001, 2. Auflage, S. 521-526.
- [2] Ch. Kommer, T. Tugendhat, N. Wahl: *Tutorium Physik fürs Nebenfach* Springer-Spektrum, 2. Auflage, S. 168, 172-175
- [3] H.J. Eichler, H.-D. Kronfeld, J. Sahl: *Das neue Physikalische Grundpraktikum*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2016, 3. Auflage, S. 100.

■ **NEUE ANLEITUNGEN** haben wir in diesem Semester für Sie bereit gestellt.

Wie finden Sie sie: sind sie verständlich geschrieben und hilfreich?

Ihre Meinung wird uns sehr interessieren.